

УДК 528.065+067, 625.7

Метод выявления колейности и вертикальных конструкций по облакам точек автомобильных дорог на основе экстремальных уклонов

Е. А. Гребенюк^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

Для цитирования: Гребенюк Е. А. Метод выявления колейности и вертикальных конструкций по облакам точек автомобильных дорог на основе экстремальных уклонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 467–475. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-467-475

Аннотация

При проведении обследований автомобильных дорог с применением технологии лазерного сканирования остро стоит задача идентификации элементов дорожного обустройства и колейности по облакам точек. На практике не всегда возможно проводить сканирование с соблюдением всех правил, в связи с чем в облаках точек присутствует большое число шумов, а сама плотность точек местами не позволяет задействовать алгоритмы автоматической классификации; кроме того, сложность и отсутствие оптимизации ряда алгоритмов зачастую требуют ограничения размера исследуемых данных и потребляют значительную часть доступных аппаратных ресурсов компьютера. В связи с этим обработка данных носит преимущественно ручной характер. **Цель:** Предложить метод идентификации наклонных (и вертикальных) конструкций, а также колейности на основе анализа уклонов между соседними точками облака точек с упором на производительность на больших данных и прогнозируемой величиной расхода вычислительных ресурсов компьютера. **Методы:** В данном исследовании используется преобразование облака точек с классифицированной землей через CSF-алгоритм. Рассматриваемый метод был реализован на языке программирования C++ как надстройка к САПР nanoCAD для работы с облаками точек в ее среде. В качестве вспомогательного инструмента формирования контуров была использована геометрическая библиотека с открытым исходным кодом GEOS. Апробация предложенного метода проведена на материалах лазерного сканирования дорог Санкт-Петербурга. **Практическая значимость:** Вычислительная сложность метода квадратично зависит от размера облака точек и не зависит от его объема, что позволяет использовать метод для обработки облаков точек плохого качества. В результате пользователь получает набор полигонов (замкнутых контуров) для требуемых величин уклонов с возможностью отрисовки только полигонов заданной площади.

Ключевые слова: Автомобильные дороги, колейность, облака точек, эксплуатация дорог, лазерный сканер, классификация облака точек.

Введение

Лазерное сканирование наряду с фотограмметрией активно применяется для задач обследования инфраструктуры автомобильных дорог, особенно при создании эксплуатационных цифровых

моделей. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с традиционными изысканиями и необходимость соблюдения определенного режима работ, данные лазерного сканирования позволяют решать большее число задач в отличие

от традиционных изысканий, а главное — позволяют минимизировать влияние человеческого фактора на достоверность получаемых сведений о местности. Несмотря на принципиальную разность в процедуре съемок и оборудовании, данные фотограмметрии могут быть представлены в формате облака точек, а параллельно с лазерной съемкой также могут формироваться панорамные изображения, в связи с чем к результатам обоих вариантов съемки могут быть применены одни и те же алгоритмы и подходы работы с данными, включая проблематику обработки данных.

Комплексная оценка существующих технических средств и способов сканирования представлена в диссертации Дмитрия Викторовича Берегового. Для классификации объектов местности используется спектральный анализ пикселей полученных изображений при фотограмметрии. Векторизация сырых данных (растровых изображений) опирается на распознанные классы с последующим формированием полигональных объектов для групп пикселей (точек местности) одного класса. В качестве среды анализа используется программа ArcMap из поставки ПО ArcGIS. Также автор упоминает особенность последнего времени — использование машинного обучения для распознавания образов в отснятых данных [1]. Тема использования машинного обучения и нейронных сетей для идентификации отдельных групп объектов фигурирует в трудах А. Ткачевой, А. Федоровой и др. [2, 3].

Помимо задач инвентаризации и перевода в цифровой вид имеющейся транспортной инфраструктуры, лазерное сканирование и фотограмметрия активно применяется для оценки поперечной ровности автомобильных дорог и вычисления объемов работ для ремонта дорожного полотна [4]. Предлагаются методики съемки поверхности автодороги и отрисовки по ним продольных и поперечных профилей покрытия в среде САПР InRoads для получения площади

и глубины колеиности, а также оценки отклонений фактических геометрических характеристик трассы от проектных (нормативных) значений [5]. В альтернативу оценки глубины колеи при помощи лазерного сканирования также могут использоваться и фотограмметрические данные, в доказательство этого приводится пример автомобиля ГАЗ-3221 «Газель» с установленным фотограмметрическим оборудованием для авторского способа измерения колеиности [6]. Для постобработки полученных данных лазерного сканирования для идентификации колеиности по сравнению с измерениями трехметровой рейкой наиболее предпочтительно использовать метод вейвлетов [7].

Не всегда обследование состояния автомобильных дорог может проводиться в удобное время в отсутствие других транспортных средств и при соответствующей погоде; в силу естественных причин получаемые в результате обработки сырые данные (облаков точек) зачастую имеют большой процент шума и брака, в связи с чем идентификация каких-либо элементов инфраструктуры, а также колеиности носит затяжной характер с использованием в основном ручного труда. При массовых съемках неизбежны накладки, приводящие к получению подобных некачественных данных, в связи с чем на первый план выходят подходы, позволяющие в автоматическом или полуавтоматическом режиме обрабатывать сырые данные (облаков точек и/или изображений).

На основе авторского опыта участия в мероприятиях по обследованию автомобильных дорог Санкт-Петербурга для формирования по ним цифровых моделей организации дорожного движения и составленному методу оценки трудозатрат на обработку данных лазерного сканирования, трудозатраты на первичное позиционирование элементов транспортной инфраструктуры по облакам точек занимают существенное время,

фактически порядка 200 человеко-дней из расчета 8-часового рабочего дня на 1000 км. Наибольший объем работ из этого времени приходится именно на ручную отрисовку границ и положения характерных объектов инфраструктуры, так как технические задания требуют геодезической точности позиционирования границ и элементов транспортной инфраструктуры в цифровой модели [8].

Метод исследования

Для облегчения существенной доли ручного труда в части определения положения точечных и линейных элементов транспортной инфраструктуры, а также выявления ям и колеиности предлагается рассмотреть следующий метод обработки облаков точек, основанный на анализе экстремальных уклонов между соседними точками облака точек.

Шаг 1 (опциональный): выравнивание облака точек по высоте в плоскости сканирования.

Шаг 2: выделение точек земли при помощи Cloth Simulation Filter [9].

Шаг 3: формирование сетки точек с заданным размером ячейки сетки.

Шаг 4: вычисление максимального уклона (угла) для каждой ячейки сетки для действительных точек на заданном удалении от данной.

Шаг 5: выделение участков с уклонами больше заданного значения (или в диапазоне значений) в группы и их отрисовка в векторном виде.

Предлагаемое на шаге 1 выравнивание облака точек заключается в корректировке отметок Z точек облака на значение, рассчитываемое от оси дороги/трека проезда сканирующего автомобиля (если речь о мобильном лазерном сканировании). При наличии на местности выраженного рельефа и, как следствие, выраженного продольного профиля дороги существующие алгоритмы классификации облаков точек показывают заведомо худший результат, чем если бы речь шла о равнинной местности. Так как задачи определения

позиционирования элементов инфраструктуры автомобильной дороги и колеиности касаются в большей части планового положения, то высотой Z точек можно пренебречь или в крайнем случае, имея точные плановые координаты, установить значение Z по оригинальным данным для соответствующих точек.

Выделение точек земли

В 2016 г. Wuming Zhang предложил способ фильтрации (Cloth Simulation Filter, CSF далее) облака точек на «точки земли» и «остальные точки», основываясь на идее создания промежуточной структуры для расчетных точек облака точек. Анализируя отношения между ячейками структуры и точками облака точек, выделяется поверхность земли. Соответственно, не вошедшие в данное число точки относятся к другой группе [9]. Используя минимальное число настраиваемых параметров расчета CSF-метод также обладает сравнительно небольшой затратой памяти вычислительной машины для своей реализации по сравнению с иными алгоритмами выделения шумов и классификации облаков точек. Автором оригинального метода были также предложены к использованию его разновидности, например P-CSF с использованием полярных координат для вычисления оси сканируемых тоннелей и фильтрации шумов облаков точек для данных сооружений [10]. На основе данного метода классификации различные авторские коллективы предлагают свои реализации алгоритмов выделения точек земли [11], считая его эталонным.

Настоящий метод опирается на облака точек с классифицированной землей именно через CSF-алгоритм. В оригинальном виде он реализован в виде одноименного плагина в программе с открытым исходным кодом для работы с облаками точек — CloudCompare. На ранних этапах исследования выполнен его перенос в состав функций надстройки TBS Cloud для nanoCAD

с улучшениями в части работы с памятью для обработки большого объема данных при меньшем использовании доступной оперативной памяти ПК.

Достаточными расчетными параметрами CSF для выделения точек земли облаков точек по линейным объектам предлагается считать следующие значения. В скобках даны формулировки из оригинальной статьи [9], до них — формулировка в плагине в среде CloudCompare:

- Cloth resolution (GR, grid resolution): 1.0;
- Max iterations (dT, time step) = 700;
- Classification threshold (RI, rigidity) = 0.2;
- Slope processing (ST, steep slope fit factor) = true.

Приведенные параметры были определены экспериментально, как дающие сравнительно точный результат при умеренных временных затратах на расчет. Флаг Slope processing отвечает за учет вертикальных конструкций: бордюрного камня, подпорных стенок. Classification threshold — фактически означает, что в поверхность точек земли попадут точки не выше этого значения от поверхности проезжей части дороги. Размер сетки Cloth resolution принят 1.0, так как не было замечено принципиального влияния меньших значений на точность результата (а скорость расчета падала квадратично при уменьшении шага сетки). Величина Max iterations принята чуть более рекомендуемой по умолчанию за счет анализа более плотного облака точек (в оригинальной статье автор исследует LIDAR-данные со значительно меньшей плотностью точек).

Формирование сетки точек с заданным размером ячейки сетки

Для полученного облака точек по земле и наземным сооружениям необходимо сформировать плоскую сеть размерами $M \times N$ с шагом S в пределах ограничивающей призмы (BBOX) геометрического множества точек облака точек. В частных случаях целесообразно использовать

сеть, повернутую относительно прямого участка оси трассы, — для минимизации количества пустых ячеек и, как следствие, лишнего расхода памяти и вычислительных ресурсов ПК. При этом M будет характеризовать координаты X , а N — координаты Y , если речь идет о правой декартовой системе координат, в которой, как правило, располагаются облака точек. Пусть точка P_{\min} будет характеризовать левую нижнюю вершину ограничивающей призмы, а P_{\max} — верхнюю правую вершину, при этом для удобства расчетов координаты минимальной точки будут взяты с округлением до целых в меньшую сторону, а максимальной точки — в большую сторону из расчета, что единицы измерения облака точек — метры.

При программной реализации сети по умолчанию все ячейки будут иметь фиксированное значение 0. Так как облака точек отображают реальную местность, нулевая высота (в России для Балтийской системы высот 1977 г.) явление достаточно редкое; тем более что координаты точек часто имеют 4-5 знаков после запятой (при съемке в метрах), в связи с чем можно пренебречь точками облака точек, имеющих чисто нулевые координаты. В противном случае при инициализации массива $M \times N$ необходимо задать такое значение Z по умолчанию, какое не будет встречаться ни у одной точки облака точек.

Значением ячейки сетки будет высота точки облака точек Z . При возможности в программной реализации ее также следует представлять в более экономном по расходу памяти варианте — например, путем вычитания минимальной отметки Z облака точек и представления остатка как целого числа unsigned short, домноженного на 1000 (для единиц высоты в мм) в альтернативу хранения прямого значения Z в виде числа float/double, занимающего большее число байтов в памяти.

Принцип заполнения ячеек сети будет заключаться в итеративном переборе точек облака

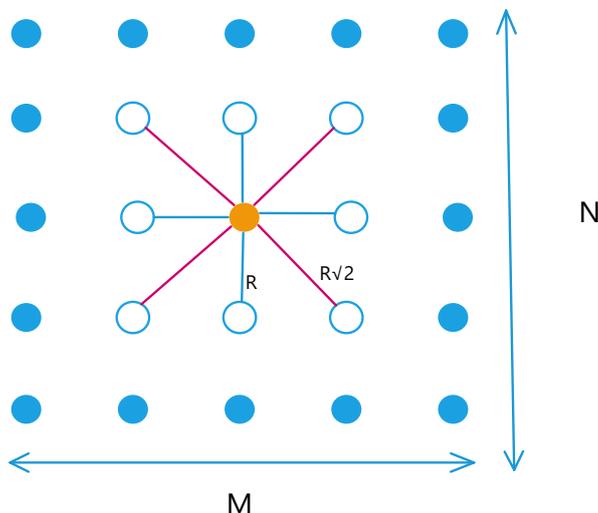


Рис. 1. Схема выборки точек вокруг данной на расстоянии R

точек, вычисления для координат точки P_x, P_y, P_z ее позиции в сети $M \times N$ вида $m; n$ и записи в ячейку сети $m; n$ значения Z анализируемой точки (подробнее см. формулу 1 ниже).

$$m = \left\lfloor \frac{(P_x - P_{\min x})}{S} \right\rfloor; n = \left\lfloor \frac{(P_y - P_{\min y})}{S} \right\rfloor. \quad (1)$$

Помимо пары чисел $m; n$, задающих положение точки в сети $M \times N$, положение также может описываться одним числом T из предположения, что отсчет точек в сети идет слева направо и снизу вверх:

$$T = m \cdot S + n. \quad (2)$$

Использование варианта описания положения точки в сети через число удобно при программной реализации в виде выделения массива памяти заданного размера (на языке C/C++ это функция `calloc/malloc`). Очевидно, что увеличение площади анализируемых данных будет иметь квадратичную зависимость с выделяемыми ресурсами.

Вычисление максимальных уклонов точек

Для сформированной сети $M \times N$ необходимо создать равновеликую по размеру (и памяти)

структуру $P \times Q$, ячейки которой будут содержать информацию по уклонам. Под уклонами будем понимать максимальный угол между данной точкой P и действительными соседними точками на заданном расстоянии R . Под «действительными» будем понимать те ячейки, где величина Z не равна значению по умолчанию (обычно нулю). Если на расстоянии R вблизи анализируемой точки нет действительных точек, то уклон для нее будет равен нулю.

Целевым значением угла будет величина арктангенса от абсолютной разности высот анализируемой и соседней точек к расстоянию между анализируемой и соседней точкой. В представленном выше примере есть 2 типа расстояний — равные R в случае удаления соседней точки по одной из осей и $R \sqrt{2}$ для случая диагонального расположения. Соответственно, для большего шага будут иные кратные значения, но для чистоты анализа корректно оставлять величину шага анализа R , равную изначальному размеру сетки S . Вычисленное значение в радианах приводится для удобства контроля к градусной мере, но может и не приводиться для уменьшения числа операций, тем более что взятие обратных тригонометрических функций более вычислительно затратно.

Выделение участков с экстремальными уклонами и их отрисовка

Под экстремальными будем понимать уклоны, лежащие в диапазоне больше заданного значения $[A_{\min}; A_{\max}]$. Зная величины точек P_{\min} и P_{\max} , определяющих границы сетки $M \times N$, а также сформированной на ее основе $P \times Q$, для каждой ячейки сети $P \times Q$ можно определить координаты точек, величина уклона которых попадает в анализируемый диапазон $[A_{\min}; A_{\max}]$. Для полученных точек строятся контуры в виде квадратов с размером, по умолчанию чуть большим, чем шаг сетки. Перекрывающиеся области объединяются в фигуры с использованием методов геометрической библиотеки с открытым исходным кодом GEOS, а по величине их площади можно производить фильтрацию результатов. Программная реализация расчета и вывода результатов представлена на рис. 2 ниже в среде nanoCAD в виде надстройки TBS Cloud на языке программирования C++. В представленном виде шаг сетки 1 см, величина уклона, по которому производился поиск, — 85° , максимальный — 90° . В результате четко

видны 2 вертикальные стойки (дорожного знака и светофорной колонки), а также некоторое число шумов на проезжей части от проезжавших машин.

Заключение

Представленный метод позволяет автоматизировать камеральную обработку облаков точек в части идентификации вертикальных конструкций и колеености. Метод может быть полезен при обработке облаков точек с высоким процентом шума, но в любом случае будет требовать ручной верификации полученных результатов. Помимо описанной сферы применения, с его помощью также можно выявлять места перехода обочины в откос или проезжей части в обочину, отталкиваясь от нормативных уклонов элементов поперечного профиля дороги. В широком смысле метод может применяться не только для автомобильных дорог, и даже не только для дорог — а для классификации в облаках точек наклонных и вертикальных конструкций; а если заменить восприятие осей координат Y и Z (или X и Z), то и анализ горизонтальных конструкций.

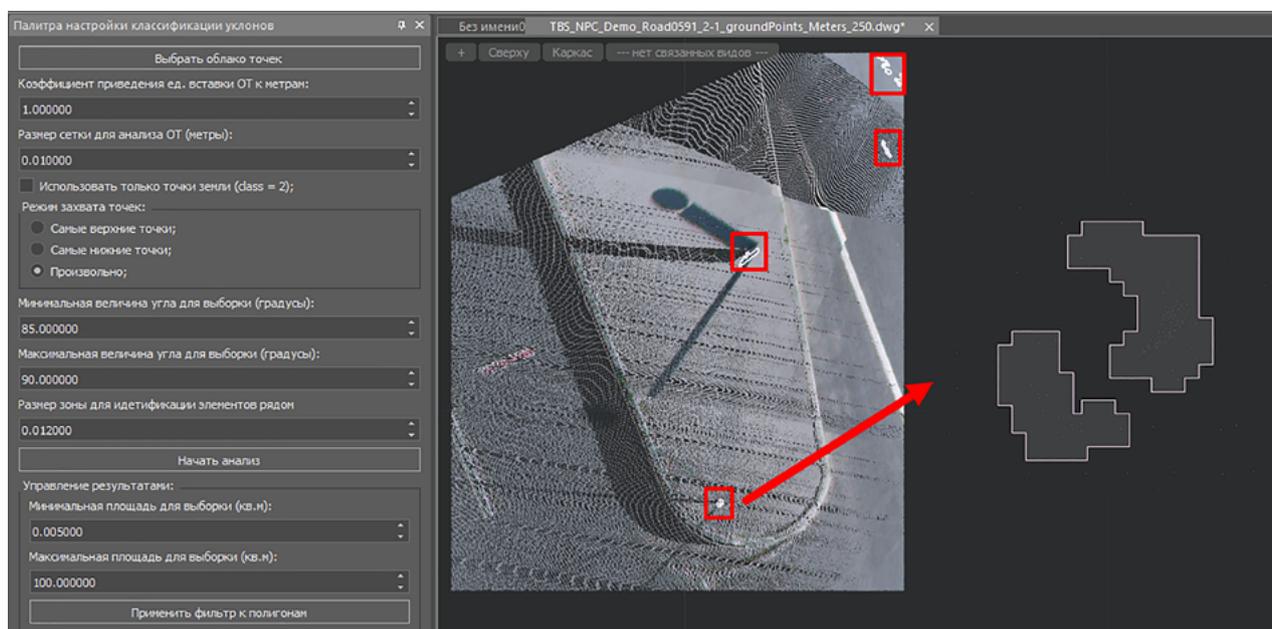


Рис. 2. Пример результата реализации метода в nanoCAD

Как показало тестирование практической реализации метода в виде надстройки к популярной САПР общего назначения *napoCAD*, наиболее длительной и ресурсоемкой операцией является выделение полигональных контуров из набора точек с целевыми значениями уклонов. В дальнейшем автором будет вестись работа над оптимизацией скорости и производительности программной реализации метода.

Список источников

1. Береговой Д. В. Создание топографических планов на основе данных съемки с беспилотного летательного аппарата и автоматизации процесса дешифрирования: специальность 25.00.32 «Геодезия»: дисс. ... канд. наук / Д. В. Береговой. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018.
2. Ткачева А. Использование данных дистанционного зондирования земли при трехмерном моделировании естественных ландшафтных сцен / А. Ткачева // *Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева*. — 2014. — № 5(57). — С. 136–144.
3. Федорова А. А. Сравнение методов классификации облаков точек, полученных с помощью технологии LIDAR / А. А. Федорова, Д. Д. Нурлыева, А. С. Желанкина, Е. А. Елисеева и др. // *Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных*, 27–28 апреля 2022 года. — М.: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. — Т. 1. — С. 262–267.
4. Масурадзе Ш. Г. Решение инженерных дорожных задач на основе данных мобильного лазерного сканирования / Ш. Г. Масурадзе, И. Г. Майсурадзе // *САПР и ГИС автомобильных дорог*. — 2016. — № 2(7). — С. 50–53. — DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.2.
5. Позняк И. Метод оценки колеяности автомобильных дорог с использованием мобильного лазерного сканирования / И. Позняк, И. Масурадзе, Ш. Масурадзе // *Конструкторское Бюро*. — 2017. — № 5.
6. Меньшиков А. Фотограмметрический метод измерения колеяности усовершенствованных дорожных покрытий / А. Меньшиков, Н. Скоморохова // *Наука, техника и образование*. — 2016. — № 7(25). — С. 48–49. — DOI: 10.20861/2312-8267-2016-25-002.
7. Лушников Н. Измерение глубины колеи на покрытии автомобильной дороги методом лазерного сканирования / Н. Лушников, П. Лушников, Т. Лалова, Д. Ковалев // *Дороги и мосты*. — 2020. — № 2(44). — С. 138–144.
8. Гребенюк Е. А. Мобильное лазерное сканирование городских дорог: оценка трудозатрат для получения качественного результата / Е. А. Гребенюк, С. И. Ротков // *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон», 19–21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН*. — М.: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2023. — С. 701–709. — DOI: 10.20948/graphicon-2023-701-709.
9. Wumming Z. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation / Z. Wumming, Q. Jianbo, W. Peng et al. // *Remote Sensing*. — 2016. — Vol. 8(6). — DOI: 10.3390/rs8060501.
10. Zhiyang Z. P-CSF Polar coordinate cloth simulation filtering algorithm for multi-type tunnel point clouds / Z. Zhiyang, C. Bingtao, L. Yuan et al. // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2025. — Vol. 155. — Part 1. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106144.
11. Выстрчил М. Г. Алгоритм выделения точек земной поверхности из данных воздушного лазерного сканирования / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, А. Ю. Романчиков, А. А. Анисеева // *Геодезия и картография*. — 2024. — № 2. — С. 2–11. — DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11.

Дата поступления: 25.04.2025

Решение о публикации: 29.05.2025

Контактная информация:

ГРЕБЕНЮК Егор Александрович — инженер;

Inj5@yandex.ru

A Method for the Detection of Motorway Rutting and Vertical Structural Damage Using Point Clouds on Extreme Gradients

E. A. Grebenyuk^{1,2}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 B, Polytechnicheskaya str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), 65, Ilinskaya str., Nizhny Novgorod, 603000, Russia

For citation: Grebenyuk E. A. A Method for the Detection of Motorway Rutting and Vertical Structural Damage Using Point Clouds on Extreme Gradients. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 467–475. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-467-475

Summary

In the context of road survey with laser scanning technology, the identification of road structure elements and rutting using point clouds poses a significant challenge. In practice, it is not always feasible to perform scanning in accordance with all the established rules. This is due to the fact that point clouds may contain a significant amount of noise, and in certain areas, a lack of point density precludes the utilization of automatic classification algorithms. Furthermore, the complexity and lack of optimization of a number of algorithms often necessitates the limitation of the data researched and the significant consumption of available computer hardware resources. Consequently, the processing of the data is predominantly manual. **Purpose:** A method for identifying sloping/vertical structures and rutting should be developed. This method should be based on slope analysis between neighbouring cloud points. The focus should be on big data performance and the predictive value of hardware computing resource consumption. **Methods:** The present study employs point cloud transformation in conjunction with land classification according to the CSF algorithm. The method under consideration was implemented in the C++ programming language as an add-on to nanoCAD system of automated design (SAD) for working with point clouds in its environment. The GEOS open source geometry library was used as an auxiliary tool for the generation of contour. The validation of the proposed method was carried out by laser scanning inspection of St. Petersburg roads. **Practical significance:** The computational complexity of the method is dependent to a quadratic degree on the size of the point cloud, whilst remaining independent of its volume, a property that facilitates its application in the processing of lower quality point clouds. **Results:** A user is provided with a set of polygons (closed contours) for the required slope values, with the option of drawing polygons of a specified area.

Keywords: Motorways, ruts, point clouds, road maintenance, laser scanners, point cloud classification.

References

1. Beregovoy D. V. *Sozdanie topograficheskikh planov na osnove dannykh s'emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata i avtomatizatsii protsessa deshifirovaniya: spetsial'nost' 25.00.32 "Geodeziya": diss. ... kand. nauk* [Creation of topographic plans based on unmanned aerial vehicle survey data and automation of the interpretation process: specialty 25.00.32 "Geodesy": diss. ... candidate of

sciences]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2018. (In Russian)

2. Tkacheva A. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli pri trekhmernom modelirovanii estestvennykh landshaftnykh stsen [Use of remote sensing data in three-dimensional modeling of natural landscape scenes]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva*

[Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev]. 2014, Iss. 5(57), pp. 136–144. (In Russian)

3. Fedorova A. A., Nurlyeva D. D., Zhelankina A. S., Eliseeva E. A. et al. Sravnenie metodov klassifikatsii oblakov tochek, poluchennykh s pomoshch'yu tekhnologii LIDAR [Comparison of classification methods for point clouds obtained using LIDAR technology]. *Iskusstvennyy intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya i obrabotki dannykh, 27–28 aprelya 2022 goda* [Artificial Intelligence in Automated Control Systems and Data Processing, April 27–28, 2022]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet imeni N. E. Baumana (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet) Publ., 2022, vol. 1, pp. 262–267. (In Russian)

4. Masuradze Sh. G., Maysuradze I. G. Reshenie inzhenernykh dorozhnykh zadach na osnove dannykh mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Solving road engineering problems based on mobile laser scanning data]. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog* [CAD and GIS of highways]. 2016, Iss. 2(7), pp. 50–53. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.2. (In Russian)

5. Poznyak I., Masuradze I., Masuradze Sh. Metod otsenki koleynosti avtomobil'nykh dorog s ispol'zovaniem mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Method for assessing rutting of roads using mobile laser scanning]. *Konstruktorskoe Byuro* [Design Bureau]. 2017, Iss. 5. (In Russian)

6. Men'shikov A., Skomorokhova N. Fotogrammetricheskii metod izmereniya koleynosti usovershenstvovannykh dorozhnykh pokrytiy [Photogrammetric method for measuring rutting of improved road surfaces]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2016, Iss. 7(25), pp. 48–49. DOI: 10.20861/2312-8267-2016-25-002. (In Russian)

7. Lushnikov N., Lushnikov P., Lalova T., Kovalev D. Izmerenie glubiny kolei na pokrytii avtomobil'noy dorogi metodom lazernogo skanirovaniya [Measuring the rut depth on the road surface using laser scanning]. *Dorogi i mosty*

[Roads and Bridges]. 2020, Iss. 2(44), pp. 138–144. (In Russian)

8. Grebenyuk E. A., Rotkov S. I. Mobil'noe lazernoe skanirovanie gorodskikh dorog: otsenka trudozatrata dlya polucheniya kachestvennogo rezul'tata [Mobile laser scanning of urban roads: assessment of labor costs for obtaining a high-quality result]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu "Grafikon", 19–21 sentyabrya 2023 g., Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN* [Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon", September 19–21, 2023, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences]. Moscow: Institut prikladnoy matematiki im. M. V. Keldysha RAN Publ., 2023, pp. 701–709. DOI: 10.20948/graphicon-2023-701-709. (In Russian)

9. Wumming Z., Jianbo Q., Peng W. et al. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8(6). DOI: 10.3390/rs8060501.

10. Zhiyang Z., Bingtao C., Yuan L. et al. P-CSF Polar coordinate cloth simulation filtering algorithm for multi-type tunnel point clouds. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, vol. 155, part 1. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106144.

11. Vystrechil M. G., Baltyzhakova T. I., Romanchikov A. Yu., Anikeeva A. A. Algoritm vydeleniya tochek zemnoy poverkhnosti iz dannykh vozdushnogo lazernogo skanirovaniya [Algorithm for extracting earth's surface points from airborne laser scanning data]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography]. 2024, Iss. 2, pp. 2–11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11. (In Russian)

Received: April 25, 2025

Accepted: May 29, 2025

Author's information:

Egor A. GREBENYUK — Engineer; Inj5@yandex.ru